

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2002-141198

(43)Date of publication of application : 17.05.2002

(51)Int.Cl.

H05H 13/04

(21)Application number : 2000-334833

(71)Applicant : SUMITOMO HEAVY IND LTD

(22)Date of filing : 01.11.2000

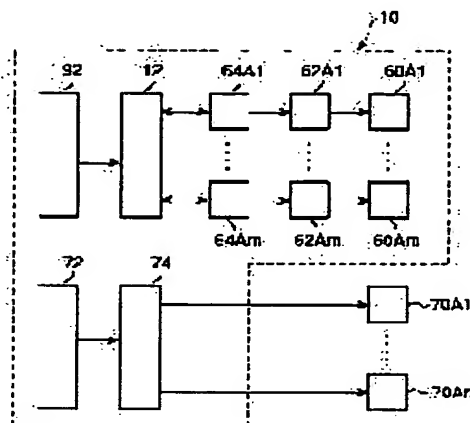
(72)Inventor : AMANO DAIZO

(54) ELECTRON BEAM TRAJECTORY CORRECTING DEVICE AND METHOD

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide an electron beam trajectory correcting method and device with an arithmetic unit capable of simply and appropriately calculating an exciting current quantity without restricted by the number of steering electromagnets and quadrupole electromagnets.

SOLUTION: This electron beam trajectory correcting device for an electron storage ring having n quadrupole electromagnets 70A1-70An is provided with m steering electromagnets 60A1-60Am, steering electromagnetic power supplies 62A1-62Am feeding exciting currents to the respective steering electromagnets 60A1-60Am, steering current control devices 64A1-64Am controlling the exciting currents of the respective steering electromagnets 60A1-60Am, a quadrupole electromagnet power supply 72, a shunt 74, a beam position monitor 92, and the arithmetic unit 12 calculating the excitation currents of the respective steering electromagnets 60A1-60Am for deflecting the angles of the electron beam so as to pass through the center of the respective quadrupole electromagnets 70A1-70An, by a singular value decomposition method.



10 : 電子ビームの軌道補正装置
 12 : 演算装置
 60A1-60Am : ステアリング電磁石
 62A1-62Am : ステアリング電磁石用電源
 64A1-64Am : ステアリング電流制御装置
 70A1-70An : 四重極電磁石
 72 : 四重極電磁石用電源
 74 : 分岐器
 90A, 90B : 1対電磁石
 92 : ビームポジションモニター

LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2003 Japan Patent Office

BEST AVAILABLE COPY

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号
特開2002-141198
(P2002-141198A)

(43) 公開日 平成14年5月17日 (2002.5.17)

(51) Int.Cl. ⁷	識別記号	F I	タームコード (参考)
H 0 5 H 13/04		H 0 5 H 13/04	Q 2 G 0 8 5

審査請求 未請求 請求項の数 7 O L (全 11 頁)

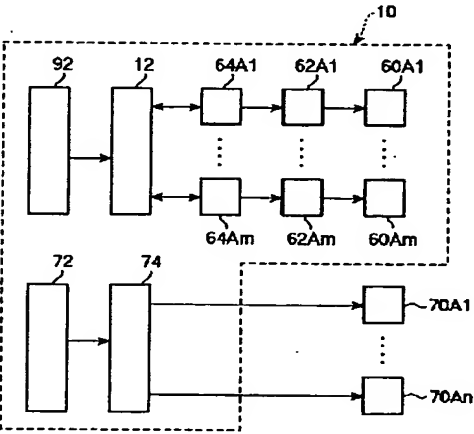
(21) 出願番号	特願2000-334833 (P2000-334833)	(71) 出願人	000002107 住友重機械工業株式会社 東京都品川区北品川五丁目9番11号
(22) 出願日	平成12年11月1日 (2000.11.1)	(72) 発明者	天野 大三 東京都田無市谷戸町2丁目1番1号 住友 重機械工業株式会社田無製造所内
		(74) 代理人	100109575 弁理士 高橋 陽介 (外1名) Fターム (参考) 2G085 AA13 BC11 CA05 CA20 CA27 CA30

(54) 【発明の名称】 電子ビームの軌道補正装置及び軌道補正方法

(57) 【要約】

【課題】 ステアリング電磁石と四重極電磁石との数の制約を受けずに、簡単かつ適切な励磁電流量を算出できる演算装置を備えた電子ビームの軌道補正装置及び軌道補正方法を提供する。

【解決手段】 n個の四重極電磁石70A1~70Anを備えた電子蓄積リングの電子ビームの軌道補正装置10において、m個のステアリング電磁石60A1~60Amと、各ステアリング電磁石60A1~60Amに励磁電流を供給するステアリング電磁石用電源62A1~62Amと、各ステアリング電磁石60A1~60Amの励磁電流を制御するステアリング電流制御装置64A1~64Amと、四重極電磁石用電源72と、分流器74と、ビームポジションモニタ92と、電子ビームが各四重極電磁石70A1~70Anの中心を通るような偏向角となるための各ステアリング電磁石60A1~60Amの励磁電流を、特異値分解法で算出する演算装置12とを備えた構成とした。



- 10 : 電子ビームの軌道補正装置
- 12 : 演算装置
- 60A1~60Am : ステアリング電磁石
- 62A1~62Am : ステアリング電磁石用電源
- 64A1~64Am : ステアリング電流制御装置
- 70A1~70An : 四重極電磁石
- 72 : 四重極電磁石用電源
- 74 : 分流器
- 90A、90B : 偏向電磁石
- 92 : ビームポジションモニタ

【特許請求の範囲】

【請求項1】 複数の偏向電磁石と、第1乃至第 n の n 個の四重極電磁石とを備え、電子（陽電子を含む）ビームを閉軌道内に所望のエネルギーで蓄積するようにした電子蓄積リングの電子ビームの軌道補正装置において、電子ビームを垂直方向、及び水平方向に偏向させる第1乃至第 m の m 個のステアリング電磁石と、前記各ステアリング電磁石に励磁電流を供給するステアリング電磁石用電源と、前記各ステアリング電磁石の励磁電流を制御するステアリング電流制御装置と、前記各四重極電磁石の励磁用の四重極電磁石用電源と、前記各四重極電磁石へ流す電流を制御する四重極電磁石電流制御装置と、電子ビームの位置を検出するビームポジションモニタと、

電子ビームが各四重極電磁石の中心を通るような偏向角となるための各ステアリング電磁石の励磁電流を、特異値分解法で算出する演算装置とを備えたことを特徴とする電子ビームの軌道補正装置。但し、 n 、 m は共に自然数である。

【請求項2】 請求項1に記載の電子ビームの軌道補正装置において、ステアリング電磁石の数 m と、四重極電磁石の数 n との関係を、 $m > n$ としたことを特徴とする電子ビームの軌道補正装置。

【請求項3】 請求項1又は2に記載の電子ビームの軌道補正装置において、上記電子ビームの軌道補正装置が、上記電子蓄積リングに適宜配置された1又は2以上の高周波加速空洞を備えるようにしたことを特徴とする電子ビームの軌道補正装置。

【請求項4】 請求項1乃至3のいずれかに記載の電子ビームの軌道補正装置において、上記演算装置として、所定の特異値よりも小さい特異値を無視して各ステアリング電磁石の励磁電流量を算出する演算装置を用いたことを特徴とする電子ビームの軌道補正装置。

【請求項5】 請求項1乃至3のいずれかに記載の電子ビームの軌道補正装置を備えた電子蓄積リングの電子ビームの軌道補正方法において、

第1に、総てのステアリング電磁石を励磁させない状態で、第 p の四重極電磁石の励磁電流量を単独で所定量変化させた場合のビームポジションモニタにおける電子ビームの変位を検出し、

第2に、第 q のステアリング電磁石に単独で励磁電流を所定量供給した状態で、第 p の四重極電磁石の励磁電流量を単独で所定量変化させた場合のビームポジションモニタにおける電子ビームの変位を検出し、

第3に、第 p の四重極電磁石について、第 p の四重極電磁石の励磁電流量を所定量変化させても、ビームポジションモニタにおける電子ビームの位置が変化しないという条件を基にして、第 q のステアリング電磁石のそれぞれの励磁電流量を変数とする第 p の方程式を作成し、

第4に、上記第3で作成した n 個の方程式を連立方程式として、第1乃至第 m のステアリング電磁石の励磁電流量の解を、特異値分解法により算出し、

第5に、この算出したステアリング電磁石の励磁電流量に基づいて、第1乃至第 m のステアリング電磁石の励磁電流量を制御し、

電子ビームが第1乃至第 n の各四重極電磁石の中心を通るように補正するようにしたことを特徴とする電子ビームの軌道補正方法。但し、 p 、 q は、 $1 \leq p \leq n$ 、 $1 \leq q \leq m$ の整数であり、 p は1から n まで、 q は1から m まで順次変動するものとする。

【請求項6】 請求項4に記載の電子ビームの軌道補正装置を備えた電子蓄積リングの電子ビームの軌道補正方法において、

第1に、総てのステアリング電磁石を励磁させない状態で、第 p の四重極電磁石の励磁電流量を単独で所定量変化させた場合のビームポジションモニタにおける電子ビームの変位を検出し、

第2に、第 q のステアリング電磁石に単独で励磁電流を所定量供給した状態で、第 p の四重極電磁石の励磁電流量を単独で所定量変化させた場合のビームポジションモニタにおける電子ビームの変位を検出し、

第3に、第 p の四重極電磁石について、第 p の四重極電磁石の励磁電流量を所定量変化させても、ビームポジションモニタにおける電子ビームの位置が変化しないという条件を基にして、第 q のステアリング電磁石のそれぞれの励磁電流量を変数とする第 p の方程式を作成し、

第4に、上記第3で作成した n 個の方程式を連立方程式として、第1乃至第 m のステアリング電磁石の励磁電流量の解を、特異値分解法により解き、かつ、所定の特異値よりも小さい特異値を無視して算出し、

第5に、この算出したステアリング電磁石の励磁電流量に基づいて、第1乃至第 m のステアリング電磁石の励磁電流量を制御し、

電子ビームが第1乃至第 n の各四重極電磁石の中心を通るように補正するようにしたことを特徴とする電子ビームの軌道補正方法。但し、 p 、 q は、 $1 \leq p \leq n$ 、 $1 \leq q \leq m$ の整数であり、 p は1から n まで、 q は1から m まで順次変動するものとする。

【請求項7】 上記ビームポジションモニタを複数とし、このビームポジションモニタを上記電子蓄積リングの適切な位置に配置するようにしたことを特徴とする請求項1乃至6のいずれかに記載の電子ビームの軌道補正装置又は電子ビームの軌道補正方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、電子ビームを閉軌道内に所望のエネルギーで蓄積し、主としてシンクロトロン放射光を発生させることを目的とした電子蓄積リングに係り、特に、蓄積した電子ビームの軌道を補正するための軌道補正装置及び、その軌道補正装置を用いた電子ビームの軌道補正方法に関する。

【0002】

【従来の技術】電子蓄積リングの特徴及び各装置については、特願平11-151339号、特願平11-227051号に比較的に詳細に説明されているので、以下、簡単に電子蓄積リングの各構成について説明する。また、本発明の電子ビームの軌道補正装置及び軌道補正方法の理解の便を図るために、その主要構成となるステアリング電磁石、及び、ビームポジションモニタについて補足説明する。その次に、従来の電子ビームの軌道補正装置及び軌道補正方法の要点について説明するものとする。

【0003】先ず、図3を用いて、電子蓄積リングの主要構成を簡単に説明する。図3に電子蓄積リングの一例として、レーストラック型の電子蓄積リング100の平面図を示す。このタイプの電子蓄積リング100では、図3に示すように180度偏向型の偏向電磁石90A、90Bを対向配置して、図示しない真空ポンプにより高真空（ $\sim 1 \times 10^{-9}$ Torr）に保たれたレーストラック型のビームダクト80内の周回軌道に、磁場の偏向作用を利用して電子ビームを蓄積する。

【0004】また、図3において、70A1、70A2は、四重極電磁石である。この四重極電磁石70A1、70A2について補足説明すると、中心の磁場強度をゼロとし、中心から距離に比例して増加する磁場分布となるような四重極磁場を励磁し、光学上の集光レンズが光を集光するのと同様に、電子ビームを集束する役割を担うものである。これらの四重極電磁石70A1、70A2により電子ビームはビームダクト80内で高真空に保たれた閉軌道内から発散することなく、安定な状態で電子蓄積リング100に蓄積されることになる。

【0005】また、電子蓄積リング100は、他の構成として、電子ビームの位置測定に用いるビームポジションモニタ92、電子ビームを所望の角度で偏向して、設計軌道を周回するように補正するステアリング電磁石60A1、60A2（以下、総括的に符号を「60」とする場合がある。）、高周波加速空洞50を備えている。

【0006】次に、図4を用いて、電子蓄積リング100の電子ビームの位置測定に用いるビームポジションモニタ92について補足説明をする。図4は、このビームポジションモニタ92の概略構造を示す縦断側面図である。

【0007】図4に示す電子蓄積リング100に用いるビームポジションモニタ92は、通常は、ボタン型ビー

ム位置モニタといわれ、このような電子蓄積リングに用いられる典型的なモニタである。

【0008】ビームポジションモニタ92は、図4にその縦断面図を示すように、真空チャンバ94に同軸コネクタ96A～96Dを介して、4つのボタン電極98A～98Dが固定されている構造である。

【0009】電子ビームが、図面に垂直な方向で、真空チャンバ内94を通過するときに4つのボタン電極98A～98Dにそれぞれ誘起された電荷を信号として検出し、電子ビームの位置を電子ビームの進行を妨げることなく、水平及び垂直方向のそれぞれで検出することができる。

【0010】図3に示す電子蓄積リング100の場合、電子ビームのスポット径は（ $\phi \sim 0.6$ mm）程度であり、このボタン型ビーム位置モニタ型のビームポジションモニタ92を用いれば、10～20 μ m程度の測定誤差で、電子ビームの位置を計測することができる。

【0011】ところで、電子蓄積リングでは、電子ビームを蓄積する場合、電子ビームが丁度設計した周回軌道上に蓄積されるようにすること、及び、その設計された軌道が安定であることは、その高品位を担保する観点から重要である。この丁度設計した周回軌道は、例えば、四重極電磁石の場合は、この四重極電磁石の中心を通るように設定されるが、四重極電磁石の設置誤差等のために、電子ビームは設計軌道に蓄積されとは限らない。

【0012】電子ビームが四重極電磁石の中心を通過しないと、四重極電磁石の励磁電流を変化させ、磁場強度を変更して、四重極電磁石の電子ビームを集束する集束力を変化させたときに、電子ビームの周回軌道位置がずれて、例えば、X線リソグラフィー用の光源としての光の発生位置が変化するなどして、電子蓄積リングの品質が劣化してしまうという問題が生じる。

【0013】そこで、従来より、ステアリング電磁石60により、設計軌道を外れた電子ビームを所望の角度で偏向して、設計軌道を周回するように補正する方法が採られている。このステアリング電磁石60の構造及び、このステアリング電磁石により、電子ビーム軌道を補正する方法について、図5及び図6を用いて簡単に説明する。

【0014】図5は、ステアリング電磁石60の縦断断面図、図6は、ステアリング電磁石60の側面図である。図5及び図6に示すように、ステアリング電磁石60は、鉄心64と、この鉄心に巻回される励磁用コイル62A～62Dを備えた構成である。

【0015】図示しない電源からステアリング電磁石60の励磁用コイル62A～62Dに励磁用電流を流し、電子ビームが通過する領域に磁場を発生させて、この磁場の作用により電子ビームを水平方向及び垂直方向のそれぞれで、所望の角度、偏向させてビームの位置を補正するようにしている。

【0016】次に、高周波加速空洞50について補足説明する。高周波加速空洞50とは、高周波電力を投入し、電子が高周波加速空洞50の加速ギャップに差し掛かった際に、丁度加速されるように高周波加速空洞50に発生する高周波電圧の位相と電子の位置とをうまく同期させて、蓄積電子にエネルギーを供給するようにした装置である。

【0017】従って、高周波加速空洞50の主要な役割は、蓄積電子にエネルギーを供給することであるが、一方で、高周波の周波数を変化させることで、それに同期して蓄積電子の周回周波数が変化し、これによって電子ビームの周回軌道が変わるので、ステアリング電磁石60と同様に、電子ビームの軌道補正に用いられることがある。

【0018】次に、特願平11-151339号に開示した従来の電子ビームの軌道補正装置及び軌道補正方法について説明する。ところで、従来技術の詳細は当該文献に示されているので、ここでは図3を参照してその要点のみを説明する。この方法は、例えば、四重極電磁石の磁場中心位置とビームポジションモニタの中心位置を厳格に一致させるのは困難であることを考慮してなされたものである。

【0019】先ず、この従来の電子ビームの軌道補正装置は、図3に示すように、 m （図示のものでは2）個のステアリング電磁石60A1、60A2と、このステアリング電磁石60A1、60A2に励磁電流を供給するステアリング電磁石用電源（図示せず）と、このステアリング電磁石用電源からステアリング電磁石60A1、60A2に供給される励磁電流を制御するステアリング電磁石電流制御装置（図示せず）とを備えている。

【0020】また、従来の電子ビームの軌道補正装置は、図3に示すように、 n （図示のものでは2）個の四重極電磁石70A1、70A2に対する四重極電磁石用電源（図示せず）と、この電源からの電流をそれぞれ個別に変化させることができる分流器（図示せず）とを備えている。また、それ以外の構成要素としては、図3に示すように、電子ビームの位置を検出するビームポジションモニタ92と、ステアリング電磁石60A1、60A2に通電すべき励磁電流量を算出する演算装置（図示せず）とを備えている。なお、以下の説明では、図示の関係上、 $m=n=2$ の場合で説明するが、 m 、 n が多数ある一般の場合でも同様の方法で電子ビームが軌道補正される。

【0021】以上の構成において、従来の電子ビームの軌道補正装置の基本動作及び軌道補正方法について説明する。先ず、第1に、総てのステアリング電磁石60A1、60A2を励磁させない状態で、第 p の四重極電磁石70Apの励磁電流量を単独で所定量変化させた場合のビームポジションモニタ92における電子ビームの変位を検出し、整数 p を1から n まで順次変化させること

により、第1乃至第 n の四重極電磁石70A1、70A2の変位を求める。

【0022】第2に、第 q のステアリング電磁石60Aqに単独で励磁電流を所定量供給した状態で、第 p の四重極電磁石70Apの励磁電流量を単独で所定量変化させた場合のビームポジションモニタにおける電子ビームの変位を検出し、整数 q を1から m まで順次変化させることにより、第 q のステアリング電磁石60Aqに単独で励磁電流を所定量供給した第 p の四重極電磁石70Apの励磁電流を所定量変化させた場合におけるビームポジションモニタでの変位を求める。

【0023】第3に、第 p の四重極電磁石70Apについて、第 p の四重極電磁石70Apの励磁電流量を所定量変化させても、ビームポジションモニタ92における電子ビームの位置が変化しないという条件を基にして、第 q のステアリング電磁石60Aqのそれぞれの励磁電流量を変数とする第 p の方程式を作成し、 p を1から n まで順次変化させることにより、 n 個の方程式を演算装置において作成する。

【0024】第4に、上記第3で作成した n 個の方程式を連立方程式として、第1乃至第 m のステアリング電磁石60A1、60A2の励磁電流量の解を算出する。第5に、第4で算出した第1乃至第 m のステアリング電磁石60A1、60A2の励磁電流量に基づいて、第1乃至第 m のステアリング電磁石60A1、60A2の励磁電流量を制御し、電子ビームの軌道を四重極電磁石70A1、70A2の磁場中心を通過するように電子ビームの軌道を補正する。

【0025】これにより、従来の軌道補正装置を用いると、簡易に電子ビームの軌道を四重極電磁石70A1、70A2の磁場中心を通過するように電子ビームの軌道を補正することができ高品位の電子蓄積リング100とすることが可能になる。

【0026】

【発明が解決しようとする課題】ところで、従来の電子ビームの軌道補正方法では、上述したように、四重極電磁石の数 n に等しい数の連立方程式を、周知のアルゴリズムで解いて、各ステアリング電磁石の励磁電流を算出する方法を用いていた。この従来の方法では、四重極電磁石の数 n とステアリング電磁石の数 m が同数の場合、即ち、連立方程式の数と変数の数が同数の場合は、周知の通り、各変数の解が一意に求められる。

【0027】また、四重極電磁石の数 n が、ステアリング電磁石の数 m よりも大きい場合、即ち、連立方程式の数が、変数の数よりも多い場合は、最小自乗法により解を最適値化して算出するようにしていた。

【0028】一方、四重極電磁石の数 n が、ステアリング電磁石の数 m よりも小さい場合、即ち、連立方程式の数が変数の数よりも少ない場合は、良く知られている通り、各変数の解は不定となり、この場合は、各ステアリ

ング電磁石の励磁電流量を計算できず、電子ビームの軌道を補正することができなかった。

【0029】しかし、ステアリング電磁石の数を四重極電磁石の数より多くすることができなければ、小型電子蓄積リングのように電子蓄積リングに設置する四重極電磁石が少ない場合、それに連動してステアリング電磁石の数が少なくなり、電子ビームの軌道補正が困難になる。また、1つ当たりのステアリング電磁石に過大な電流を流す必要がある場合が考えられる。更には、算出結果が許容電流量を超えてしまい、電子ビームの軌道補正自体が不可能となるケースも想定し得る。

【0030】また、従来の連立方程式を解く方法では、ステアリング電磁石同士が接近していたり、ビームポジションモニタにおける軌道の変位量が同じようなステアリング電磁石が存在する場合には、解が機械的に算出されるため、求められたステアリング電磁石の励磁電流量が極めて大きな値となり、この結果に基づいて軌道ム補正を行うと、電子ビームの軌道が不安定になるという問題も備えていた。

【0031】本発明は、上記課題（問題点）を解決し、ステアリング電磁石と四重極電磁石との数の制約を受けずに、簡単かつ適切な励磁電流量を算出できる演算装置を備えた電子ビームの軌道補正装置及び軌道補正方法を提供することを目的とする。

【0032】

【課題を解決するための手段】本発明の電子ビームの軌道補正装置は、請求項1に記載のものでは、複数の偏向電磁石と、第1乃至第nのn個の四重極電磁石とを備え、電子（陽電子を含む）ビームを閉軌道内に所望のエネルギーで蓄積するようにした電子蓄積リングの電子ビームの軌道補正装置において、電子ビームを垂直方向、及び水平方向に偏向させる第1乃至第mのm個のステアリング電磁石と、前記各ステアリング電磁石に励磁電流を供給するステアリング電磁石用電源と、前記各ステアリング電磁石の励磁電流を制御するステアリング電流制御装置と、前記各四重極電磁石の励磁用の四重極電磁石用電源と、前記各四重極電磁石へ流す電流を制御する四重極電磁石電流制御装置と、電子ビームの位置を検出するビームポジションモニタと、電子ビームが各四重極電磁石の中心を通るような偏向角となるための各ステアリング電磁石の励磁電流を、特異値分解法で算出する演算装置とを備えた構成とした。但し、n、mは共に自然数である。

【0033】このように構成すると、ステアリング電磁石と四重極電磁石との数の制約を受けずに、ステアリング電磁石の励磁電流が算出でき、四重極電磁石の個数に関わらず、ステアリング電磁石の数を増やすことができるので、多くのステアリング電磁石を使用して電子ビームの軌道補正精度を向上させることが可能になり、蓄積電子のビームクォリティが向上する。特に、小型電子蓄

積リングのように、四重極電磁石の設置スペースが限られている場合に、四重極電磁石の数に制限されずにステアリング電磁石を増やすことができるので、効果的にステアリング電磁石を使用して、電子ビームの軌道補正精度を向上させることが可能である。また、1つ当たりのステアリング電磁石に過大な電流を流す必要があるケースや、電子ビームの軌道補正自体が不可能となるケースを回避できる。

【0034】請求項2に記載の電子ビームの軌道補正装置は、請求項1に記載の電子ビームの軌道補正装置において、ステアリング電磁石の数mと、四重極電磁石の数nとの関係を、 $m > n$ とした構成とした。

【0035】本発明の電子ビームの軌道補正装置では、このように、四重極電磁石の数がステアリング電磁石よりも少なく、従来の電子ビームの軌道補正装置ではステアリング電磁石の励磁電流量を算出できなかった場合に、特に効果的である。

【0036】請求項3に記載の電子ビームの軌道補正装置は、請求項1又は2に記載の電子ビームの軌道補正装置において、上記電子ビームの軌道補正装置が、上記電子蓄積リングに適宜配置された1又は2以上の高周波加速空洞を備えるようにした構成とした。

【0037】このように構成すると、高周波加速空洞の軌道補正機能も活用できるので、電子ビームの軌道補正の方法が多様化し、軌道補正の精度が向上する。

【0038】請求項4に記載の電子ビームの軌道補正装置は、請求項1乃至3に記載の電子ビームの軌道補正装置において、上記演算装置として、所定の特異値よりも小さい特異値を無視して各ステアリング電磁石の励磁電流を算出する演算装置を用いるように構成した。

【0039】このように構成すると、ステアリング電磁石同士が接近していたり、各ビームポジションモニタにおける軌道の変位量が同じようなステアリング電磁石が存在する場合でも、適切なステアリング電磁石の励磁電流量を算出できる電子ビームの軌道補正装置とすることができる。

【0040】請求項5に記載の電子ビームの軌道補正方法は、請求項1乃至3に記載の電子ビームの軌道補正装置を備えた電子蓄積リングの電子ビームの軌道補正方法において、第1に、総てのステアリング電磁石を励磁させない状態で、第pの四重極電磁石の励磁電流量を単独で所定量変化させた場合のビームポジションモニタにおける電子ビームの変位を検出し、第2に、第qのステアリング電磁石に単独で励磁電流を所定量供給した状態で、第pの四重極電磁石の励磁電流量を単独で所定量変化させた場合のビームポジションモニタにおける電子ビームの変位を検出し、第3に、第pの四重極電磁石について、第pの四重極電磁石の励磁電流量を所定量変化させても、ビームポジションモニタにおける電子ビームの位置が変化しないという条件を基にして、第qのステア

リング電磁石のそれぞれの励磁電流量を変数とする第 p の方程式を作成し、第 4 に、上記第 3 で作成した n 個の方程式を連立方程式として、第 1 乃至第 m のステアリング電磁石の励磁電流量の解を、特異値分解法により算出し、第 5 に、この算出したステアリング電磁石の励磁電流量に基づいて、第 1 乃至第 m のステアリング電磁石の励磁電流量を制御し、電子ビームが第 1 乃至第 n の各四重極電磁石の中心を通るように補正するようにした。但し、 p 、 q は、 $1 \leq p \leq n$ 、 $1 \leq q \leq m$ の整数であり、 p は 1 から n まで、 q は 1 から m まで順次変動するものとする。

【0041】このようにすると、ステアリング電磁石と四重極電磁石との数の制約を受けずに、ステアリング電磁石の励磁電流が算出でき、四重極電磁石の個数に関わらず、電子蓄積リングの運転状況によりステアリング電磁石の数を増やすことができるので、多くのステアリング電磁石を使用して電子ビームの軌道補正が可能になり、蓄積電子のビームクォリティが向上する補正方法とすることができる。また、1 つ当たりのステアリング電磁石に過大な電流を流す必要があるケースや、電子ビームの軌道補正自体が不可能となるケースを回避できる。

【0042】請求項 6 に記載の電子ビームの軌道補正方法は、請求項 4 に記載の電子ビームの軌道補正装置を備えた電子蓄積リングの電子ビームの軌道補正方法において、第 1 に、総てのステアリング電磁石を励磁させない状態で、第 p の四重極電磁石の励磁電流量を単独で所定量変化させた場合のビームポジションモニタにおける電子ビームの変位を検出し、第 2 に、第 q のステアリング電磁石に単独で励磁電流を所定量供給した状態で、第 p の四重極電磁石の励磁電流量を単独で所定量変化させた場合のビームポジションモニタにおける電子ビームの変位を検出し、第 3 に、第 p の四重極電磁石について、第 p の四重極電磁石の励磁電流量を所定量変化させても、ビームポジションモニタにおける電子ビームの位置が変化しないという条件を基にして、第 q のステアリング電磁石のそれぞれの励磁電流量を変数とする第 p の方程式を作成し、第 4 に、上記第 3 で作成した n 個の方程式を連立方程式として、第 1 乃至第 m のステアリング電磁石の励磁電流量の解を、特異値分解法により解き、かつ、所定の特異値よりも小さい特異値を無視して算出し、第 5 に、この算出したステアリング電磁石の励磁電流量に基づいて、第 1 乃至第 m のステアリング電磁石の励磁電流量を制御し、電子ビームが第 1 乃至第 n の各四重極電磁石の中心を通るように補正するようにした。但し、 p 、 q は、 $1 \leq p \leq n$ 、 $1 \leq q \leq m$ の整数であり、 p は 1 から n まで、 q は 1 から m まで順次変動するものとする。

【0043】このように構成すると、ステアリング電磁石同士が接近していたり、各ビームポジションモニタにおける軌道の変位量が同じようなステアリング電磁石が

存在する場合でも、適切なステアリング電磁石の励磁電流量を算出できる電子ビームの軌道補正方法とすることができる。

【0044】請求項 7 に記載の電子ビームの軌道補正装置又は軌道補正方法は、上記ビームポジションモニタを複数とし、このビームポジションモニタを上記電子蓄積リングの適切な位置に配置するようにした。

【0045】このようにすると、前述した効果の外に、更に、電子ビームの軌道補正が一層精密に行え、超高精密を要求される電子蓄積リングに対応することが可能となる。

【0046】

【発明の実施の形態】本発明の電子ビームの軌道補正装置及び補正方法の一実施の形態を図 1 及び図 2 を用いて説明する。図 1 は、本発明の電子ビームの軌道補正装置の一実施の形態の構成を示すブロック図である。また、図 2 は、本発明の補正装置に用いるステアリング電磁石、ビームポジションモニタの設置個所の一例を示す電子蓄積リングの平面図である。

【0047】本実施の形態における軌道補正装置 10 は、図 1 に示すように、先ず、 m (但し図 2 では 4) 個のステアリング電磁石 60A1~60Am と、このステアリング電磁石 60A1~60Am に励磁電流を供給するステアリング電磁石用電源 62A1~62Am と、このステアリング電磁石用電源 62A1~62Am からステアリング電磁石 60A1~60Am に供給される励磁電流を制御するステアリング電磁石電流制御装置 64A1~64Am とを備えている。

【0048】また、本実施の形態における軌道補正装置 10 は、 n (但し図 2 では 2) 個の四重極電磁石 70A1~70An に対してその励磁用電源となる四重極電磁石用電源 72 と、この電源 72 からの電流をそれぞれ個別に変化させることができる分流器 (四重極電磁石電流制御装置) 74 とを備えている。また、それ以外の構成要素としては、従来の補正装置同様、電子ビームの位置を検出するビームポジションモニタ 92 と、ステアリング電磁石 60A1~60Am に通電すべき励磁電流量を算出する演算装置 12 とを備えている。なお、本実施の形態の電子ビームの軌道補正装置 10 では、ビームポジションモニタ 92 を単数用いた場合で説明する。

【0049】一方、本発明の電子ビームの軌道補正装置 10 では、従来の補正装置とは異なり、各ステアリング電磁石 60A1~60Am の励磁電流を算出する演算装置 12 は、従来の補正装置の説明で言及した連立方程式を解く際に、後述する特異値分解法で各励磁電流量を算出する演算機能を備えている。

【0050】以上の構成において、本実施の形態の電子ビームの軌道補正装置 10 の基本動作及び軌道補正方法について、図 1 及び図 2 を用いて説明する。なお、電子ビームの軌道補正は、その進行方向に対して垂直な平面

内において、水平方向及び垂直方向の双方で行うが、水平方向、垂直方向の補正の方法はほぼ同様の手順となるので、以下、特に区別することなく説明するものとする。

【0051】先ず、従来の電子ビームの軌道補正装置同様に、第1に、総てのステアリング電磁石を励磁させない状態で、第pの四重極電磁石の励磁電流量を単独で所定量 I_{p0} に変化させた場合のビームポジションモニタにおける電子ビームの変位を検出し、この変位を Z_{p0} とする。ここでは勿論、pは $1 \leq p \leq n$ の整数である。整数pを1からnまで順次変化させることにより、第1乃至第nの四重極電磁石70A1～70Anの変位が、それぞれ $Z_{10} \sim Z_{n0}$ と求めることができる。

【0052】第2に、第qのステアリング電磁石60Aqに単独で励磁電流を所定量 I_{q0} 供給した状態で、第pの四重極電磁石70Apの励磁電流量を単独で所定量 I_{p0} に変化させた場合のビームポジションモニタにおける電子ビームの変位を検出し、この変位を Z_{pq} とする。ここでは勿論、qは $1 \leq q \leq m$ の整数である。

【0053】ここで、整数qを1からmまで順次変化さ

$$Z_{10} + \sum_{i=1}^m (Z_{1i} - Z_{10}) x_i = 0$$

$$Z_{20} + \sum_{i=1}^m (Z_{2i} - Z_{20}) x_i = 0$$

⋮

$$Z_{n0} + \sum_{i=1}^m (Z_{ni} - Z_{n0}) x_i = 0$$

(1)

【0057】ところで、従来の補正装置では、第4に、上記第3で作成した上記式(1)で表されるn個の方程式を連立方程式として、第1乃至第mのステアリング電磁石60A1～60Amの励磁電流量の解を算出していた。このため、ステアリング電磁石60A1～60Amの数がm(図2では4)個、四重極電磁石70A1～70Anの数がn(図2では2)個である本実施の形態のように、 $n < m$ の場合は、連立方程式の解は不定となるので、このケースでは、電子ビームの軌道補正ができないという制約があった。そこで、本実施の形態では、後述する特異値分解法によりこの連立方程式を解くものとする。

$$Ax = b$$

ここで、Aはn行m列の行列、xは第qのステアリング電磁石60Aqの励磁電流量を、 x_q と表記した場合のxで、各ステアリング電磁石60A1～60Amでは、xは、 $x_1 \sim x_m$ である。また、bは、総てのステアリング電磁石60A1～60Amを励磁させない状態で、第1乃至第nの各四重極電磁石70A1～70An

＊せることにより、第qのステアリング電磁石60Aqに単独で励磁電流を所定量 I_{q0} 供給した第pの四重極電磁石70Apの励磁電流を所定量変化させた場合におけるビームポジションモニタでの変位が、それぞれ $Z_{p1} \sim Z_{pm}$ と求めることができる。

【0054】更に、この手順を、整数pを1からnまで順次変化させながら繰り返すことにより、第1乃至第nの四重極電磁石70A1～70Anの変位が、それぞれ $Z_{11} \sim Z_{n,m}$ となり、 $m \cdot n$ 通りの変位を算出できる。

【0055】第3に、第pの四重極電磁石70Apについて、第pの四重極電磁石70Apの励磁電流量を所定量 I_{p0} に変化させても、ビームポジションモニタにおける電子ビームの位置が変化しないという条件を基にして、第qのステアリング電磁石60Apのそれぞれの励磁電流量を変数 x_q とする第pの方程式を作成する。pを1からnまで順次変化させることにより、n個の方程式を演算装置12において作成できる。

【0056】このn個の方程式は次式で与えられる。

【数1】

※【0058】特異値分解法によりこの連立方程式を解いて、ステアリング電磁石60A1～60Amの励磁電流量を算出した後は、従来の電子ビームの軌道補正方法同様に、第5に、この算出したステアリング電磁石60A1～60Amの励磁電流量に基づいて、第1乃至第mのステアリング電磁石の励磁電流量を制御し、電子ビームの軌道を四重極電磁石70A1、70A2の磁場中心を通過するように電子ビームの軌道を補正する。

【0059】次に、特異値分解法について説明する。一般に、式(1)の連立方程式は、次式(2)の行列形式に表現できる。

$$(2)$$

の励磁電流量を単独で所定量変化させた場合のビームポジションモニタ92における電子ビームの変位 $Z_{10} \sim Z_{n0}$ に対応するものである。

【0060】従来の補正方法では、式(2)から周知のアルゴリズムを用いて、各ステアリング電磁石60A1～60Amの励磁電流量xを求めていたが、本実施の形

※

態における補正方法では、行列Aを周知のアルゴリズム*

$$A = U^* D^* V^*$$

ここで、 U^* 、 V^* は、それぞれn行n列、m行m列の直交行列で、 V^* はこの V^* の転置行列、 D^* は、各要素 σ_i が、 $\sigma_i \geq 0$ を満たすn行m列の対角行列で、 $\sigma_1 > \sigma_2 > \dots > \sigma_l$ である。ここで、 i は、自然数で、 $1 \leq i \leq l$ で、 l は、 m 、 n のいずれか小さい方である。このように、行列Aを式(3)のように分解することを特異値分解といい、対角行列 D の各要素 σ_i を行列Aの特異値という。

【0061】ここで、 D^* が対角行列であることに注目すると、n行m列の対角行列 D^* の左側から掛け合わせ※

$$A = U D V^*$$

ここで、 U 、 V は、それぞれn行1列、m行1列の直交行列で、 V^* はこの V の転置行列、 D は、各成分 σ_i が、 $\sigma_i \geq 0$ を満たす1次の対角行列である。ここで l は、★

$$x = V D^* U^* b$$

ここで、 U^* は U の転置行列、 D^* は、各成分 d_i が、 $d_i = \sigma_i^{-1}$ を満たす1次の対角行列である。

【0064】また、 l は m 、 n のいずれか小さい方であることに注目すると、本実施の形態の特異値分解法を用いる補正方法では、上記従来の補正方法とは異なり、四重極電磁石70A1~70Anの数 n が、ステアリング電磁石60A1~60Amの数 m よりも小さい場合でも、各ステアリング電磁石60A1~60Amの励磁電流量を算出できることを示している。

【0065】勿論、逆に、四重極電磁石70A1~70Anの数 n が、ステアリング電磁石60A1~60Amの数 m よりも大きい場合でも、従来の方法同様に、何の支障もなく、各ステアリング電磁石60A1~60Am☆30

$$x^* = V D_0^* U^* b$$

ここで、 D_0^* は、各成分 d_i が、 $d_i = \sigma_i^{-1}$ ($i \leq p$)、 $d_i = 0$ ($i > p$)を満たす1次の対角行列である。

【0067】このように、実用上の計算において、ある特異値 σ_i よりも小さい特異値を無視すれば、従来の補正方法のように解 x の値が大きくなり、電子ビームが不安定になるという問題を解消することができる。従って、ステアリング電磁石同士が接近していたり、ビームポジションモニタ92における軌道の変位量が同じようなステアリング電磁石60A1~60Amが存在する場合でも、適切なステアリング電磁石60A1~60Amの励磁電流量を算出できる補正装置10とすることができる。

【0068】なお、上記説明及び請求の範囲において、第1、第2で示した、総てのステアリング電磁石を励磁させない状態で、各四重極電磁石の励磁電流量を単独で所定量変化させた場合のビームポジションモニタにおける電子ビームの変位の検出と、各ステアリング電磁石に単独で励磁電流を所定量供給した状態で、各四重極電磁

※により、次式(3)の通り分解する。

$$(3)$$

※る行列 U^* の場合、行列 U^* のn行m列だけが有効であり、他の要素は計算結果に何の影響も与えていない。また、同様に、n行m列の対角行列 D^* の右側から掛け合わせる行列 V^* の場合、行列 V^* のm行m列だけが有効であり、他の要素は計算結果に何の影響も与えていない。

【0062】以上の事柄を踏まえると、実用的な特異値分解は、不要な領域を持たず、不要な計算を行わないために、次式(4)のように変形できる。

$$(4)$$

★上述したとおり、 m 、 n のいずれか小さい方である。

【0063】このとき、式(2)の解は、次式(5)のように求めることができる。

$$(5)$$

☆の励磁電流量を算出できる即ち、本実施の形態の補正方法によれば、四重極電磁石70A1~70Anの数 n 、ステアリング電磁石60A1~60Amの数 m に制約されず、ステアリング電磁石60A1~60Amの励磁電流量を算出でき、電子ビームの軌道を設計軌道に修正できる。

【0066】また、特異値が、 $\sigma_1 > \sigma_2 > \dots > \sigma_l$ という性質を有していることから、実用上の計算において、ある特異値 σ_i よりも小さい特異値を無視すれば、励磁電流量の近似的最小自乗解 x^* は次式(6)により求めることができる。なお、 p は、 $1 \leq p \leq l$ の自然数である。

$$(6)$$

石の励磁電流量を単独で所定量変化させた場合のビームポジションモニタにおける電子ビームの変位の検出とは、必ずしもこの順番で行わなければならないのではなく、この逆の手順としても、何ら差し支えないことを付記しておく。

【0069】また、本発明の電子ビームの軌道補正装置の他の実施の形態としては、構成要件として高周波加速空洞を付加したものを用いるようにしても良い。このようにすると、高周波加速空洞の軌道補正機能も活用できるので、電子ビームの軌道補正の方法が多様化し、軌道補正の精度が向上する。

【0070】本発明の電子ビームの軌道補正装置及び軌道補正方法は上記実施の形態に限定されず、種々の変更が可能である。先ず、本発明は、四重極電磁石の数がステアリング電磁石の数よりも少ない場合に、特に威力を発揮するが、本発明の特徴は、演算装置において、特異値分解法により、各ステアリング電磁石の励磁電流量を算出することであり、この条件に限定されるものではない。更に、従来技術及び上記実施の形態では、小型のレ

ーストラック型の電子蓄積リングで説明したが、本発明は他の形態、例えば、大型の電子蓄積リングにも適用可能である。

【0071】また、本発明の電子ビームの軌道補正装置及び軌道補正方法の特徴は、第1に、各ステアリング電磁石の励磁電流量を算出する過程において、特異値分解法を用いること、第2に、適切な各ステアリング電磁石の励磁電流量を算出するために、所定の特異値よりも小さな特異値を無視する場合があることであり、上記実施の形態では、この双方の特徴を用いた例で説明した。しかし、勿論、特異値分解法のみを用いて各ステアリング電磁石の励磁電流量を算出する方法も本発明に含まれるのは言うまでもないことである。

【0072】また、上記各実施の形態では、ビームポジションモニタを1つだけ用いた場合で説明したが、ビームポジションモニタを複数個用い、これを電子蓄積リングの適当な位置に配置して、電子ビームの位置を補正するように構成しても良い。

【0073】この場合は、各ビームポジションモニタに基づいてそれぞれ連立方程式を求めて、上述した電子ビームの軌道補正を行うことになるが、これにより、より精度の高い電子ビームの軌道補正が可能になり、超高精度を要求される電子蓄積リングに対応することが可能となる。

【0074】

【発明の効果】本発明の電子ビームの軌道補正装置及び軌道補正方法は、上述のように構成したために、以下のような優れた効果を有する。

(1) 本発明の電子ビームの軌道補正装置は、請求項1に記載したように構成したために、ステアリング電磁石と四重極電磁石との数の制約を受けずに、ステアリング電磁石の励磁電流が算出でき、四重極電磁石の個数に関わらず、ステアリング電磁石の数を増やすことができるので、多くのステアリング電磁石を使用して電子ビームの軌道補正精度を向上させることが可能になり、蓄積電子のビームクォリティが向上する。

(2) 特に、小型電子蓄積リングのように、四重極電磁石の設置スペースが限られている場合に、四重極電磁石の数の制限されずにステアリング電磁石を増やすことができるので、効果的にステアリング電磁石を使用して、電子ビームの軌道補正精度を向上させることが可能である。

(3) また、1つ当たりのステアリング電磁石に過大な電流を流す必要があるケースや、電子ビームの軌道補正自体が不可能となるケースを回避できる。

【0075】(4) 請求項2に記載の電子ビームの軌道補正装置は、ステアリング電磁石の数 m と、四重極電磁石の数 n との関係を、 $m > n$ としたために、四重極電磁石の数がステアリング電磁石よりも少なく、従来の電子ビームの軌道補正装置ではステアリング電磁石の励磁電

流量を算出できなかった場合に、特に効果的である。

【0076】(5) 請求項3に記載の電子ビームの軌道補正装置は、電子ビームの軌道補正装置が、電子蓄積リングに適宜配置された1又は2以上の高周波加速空洞を備えるようにしたために、高周波加速空洞の軌道補正機能も活用できるので、電子ビームの軌道補正の方法が多様化し、軌道補正の精度が向上する。

【0077】(6) 請求項4に記載の電子ビームの軌道補正装置は、演算装置として、所定の特異値よりも小さい特異値を無視して各ステアリング電磁石の励磁電流を算出する演算装置を用いるようにしたために、ステアリング電磁石同士が接近していたり、各ビームポジションモニタにおける軌道の変位量が同じようなステアリング電磁石が存在する場合でも、適切なステアリング電磁石の励磁電流量を算出できる電子ビームの軌道補正装置とすることができる。

【0078】(7) 本発明の電子ビームの軌道補正方法は、請求項5に記載したように構成したため、ステアリング電磁石と四重極電磁石との数の制約を受けずに、ステアリング電磁石の励磁電流が算出でき、四重極電磁石の個数に関わらず、電子蓄積リングの運転状況によりステアリング電磁石の数を増やすことができるので、多くのステアリング電磁石を使用して電子ビームの軌道補正が可能になり、蓄積電子のビームクォリティが向上する補正方法とすることができる。

(8) また、1つ当たりのステアリング電磁石に過大な電流を流す必要があるケースや、電子ビームの軌道補正自体が不可能となるケースを回避できる。

【0079】(9) また、請求項6に記載の電子ビームの軌道補正方法とすると、ステアリング電磁石同士が接近していたり、各ビームポジションモニタにおける軌道の変位量が同じようなステアリング電磁石が存在する場合でも、適切なステアリング電磁石の励磁電流量を算出できる電子ビームの軌道補正方法とすることができる。

【0080】(10) 請求項7に記載の電子ビームの軌道補正装置又は軌道補正方法は、ビームポジションモニタを複数とし、このビームポジションモニタを上記電子蓄積リングの適切な位置に配置するようにしたため、前述した効果の外に、更に、電子ビームの軌道補正が一層精密に行え、超高精密を要求される電子蓄積リングに対応することが可能となる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の電子ビームの軌道補正装置の一実施の形態を示すブロック図である。

【図2】本発明の電子ビームの軌道補正装置の一実施の形態に用いる主要構成の配置を示す電子蓄積リングの平面図である。

【図3】電子蓄積リングの基本構成を説明するための平面図である。

【図4】電子蓄積リングに用いるビームポジションモニ

17

タの構成を示す縦断面図である。

【図5】ステアリング電磁石の構成を示す縦断面図である。

【図6】ステアリング電磁石の構成を示す側面図である。

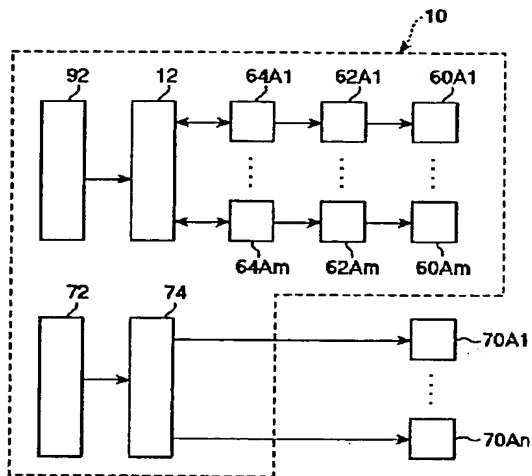
【符号の説明】

10：電子ビームの軌道補正装置

12：演算装置

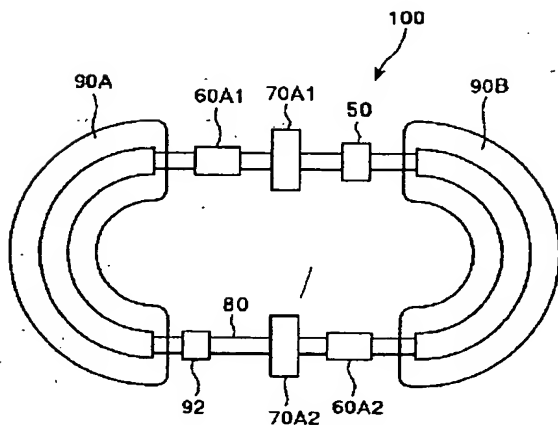
50：高周波加速空洞

【図1】



10：電子ビームの軌道補正装置
12：演算装置
60A1～60Am：ステアリング電磁石
62A1～62Am：ステアリング電磁石用電源
64A1～64Am：ステアリング電流制御装置
70A1～70An：四重極電磁石
72：四重極電磁石用電源
74：分流器
90A、90B：偏向電磁石
92：ビームポジションモニタ

【図3】



18

* 60A1～60Am、60：ステアリング電磁石

60A1～60Am：ステアリング電磁石用電源

60A1～60Am：ステアリング電流制御装置

70A1～70An：四重極電磁石

72：四重極電磁石用電源

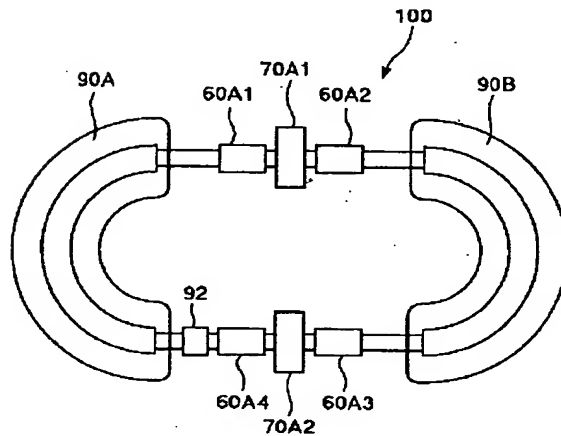
74：分流器（四重極電磁石電流制御装置）

90A、90B：偏向電磁石

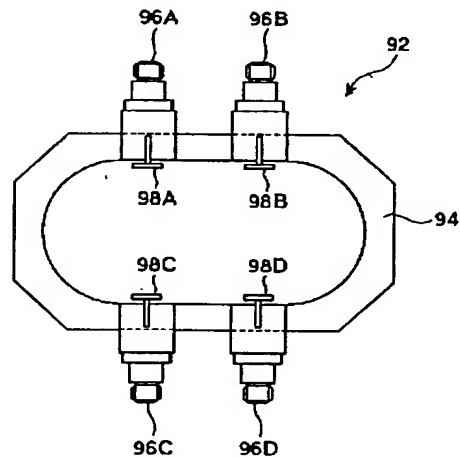
92：ビームポジションモニタ

* 100：電子蓄積リング

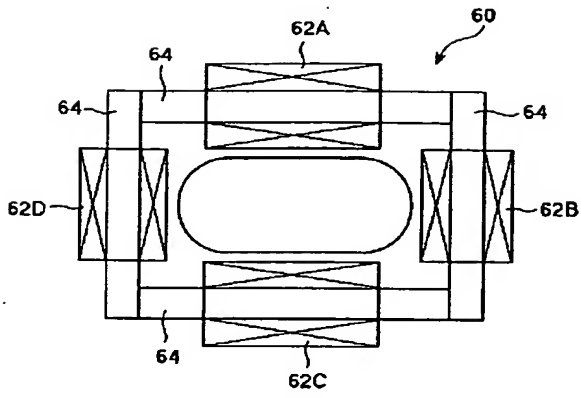
【図2】



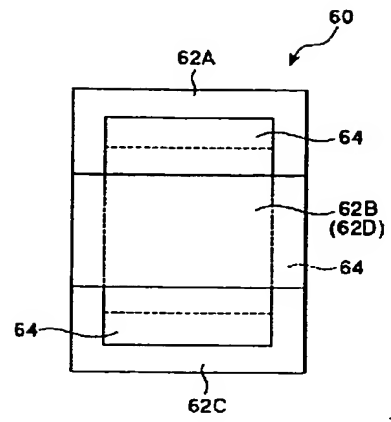
【図4】



【図5】



【図6】



**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☐ FADED TEXT OR DRAWING
- ☒ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☐ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.